N° D'ORDRE : 35

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR TROISIÈME CYCLE

(SPÉCIALITÉ : MÉTROLOGIE)

PAR

Jeannette HUMBERT
Licenciée ès-Sciences

ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN SPECTROSENSITOMÈTRE A LENTILLES CYLINDRIQUES

Soutenue le 8 Juillet 1964 devant la Commission d'examen

M. P. M. DUFFIEUX	Président
M^me^ A.-M. ROZIS	Examinateurs
M. J.-Ch. VIÉNOT	Examinateurs

N· D'ORDRE : 35

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR TROISIÈME CYCLE

(SPÉCIALITÉ : MÉTROLOGIE)

PAR

Jeannette HUMBERT
Licenciée ès-Sciences

ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN SPECTROSENSITOMÈTRE A LENTILLES CYLINDRIQUES

Soutenue le 8 Juillet 1964 devant la Commission d'examen

M. P. M. DUFFIEUX — Président

M^me^ A.-M. ROZIS, M. J.-Ch. VIÉNOT — Examinateurs

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON

Doyen Honoraire
M. GLANGEAUD

Professeurs Honoraires
MM. BAILLAUD, DUFFIEUX, THIRY, TRILLAT, UEBERSFELD, VINCENSINI.

Maître de Conférences Honoraire
M. GRANIER

Doyen

M.	JACQUEMAIN	Chimie Appliquée

Assesseur

M.	MESNAGE	Chronométrie

Professeurs

MM.	TRONCHET	Botanique
	CHATELET	Mathématiques
	PERROT	Chimie Générale
	DREYFUSS	Géologie Minéralogie
	THEOBALD	Géologie
	CROISOT	Méthodes Mathématiques de la Physique
	DELHAYE	Astronomie
	QUANTIN	Botanique
	CHALEAT	Mécanique Appliquée
	RIPPLINGER	Physiologie Animale
	NAHON	Mécanique Théorique
	BERNARD	Chimie Physique
	RIGAL	Mathématiques
	VIENOT	Physique Générale
Mme	ROZIS	Physique
M.	THIEBAUT	Géologie Minéralogie

Professeurs sans chaire

MM.	POTIER	Cristallographie Physique
	DEVIN	Chimie Générale
	GOMOT	Zoologie
	MOTCHANE	Electronique

Maîtres de conférences

MM.	VALLEE	Mécanique Appliquée
	REAL	Zoologie
	GOUARNE	Mathématiques
Mlle	LEGRAND	Botanique
M.	THEOBALD	Physique PCB. SPCN
	REMOND	Chargé d'Enseignement de la Maîtrise de Conférences de Chronométrie

Conseiller administratif universitaire
M. LAMBERT

ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN SPECTROSENSITOMÈTRE A LENTILLES CYLINDRIQUES *

J. HUMBERT

SOMMAIRE

Ce travail a pour objet la construction d'un spectrosensitomètre à lentilles cylindriques et la recherche de ses applications possibles : la plus courante d'entre elles est l'étude des caractéristiques (courbes H & D) des émulsions photographiques ; mais celle-ci peut constituer le point de départ de nombreuses autres : comparaison des sources et mesure de leur répartition spectrale énergétique, ou bien détermination des sensibilités spectrales relatives et absolues des émulsions photographiques.

Cependant le tracé des courbes H & D n'est pas indispensable et la seule mesure des hauteurs de raies apparues sur les clichés fournit des indications par exemple sur la transmission spectrale des verres, ou sur l'abondance relative des divers constituants d'un alliage.

INTRODUCTION

Les avantages et incovénients des différents types de sensitomètres sont décrits dans de nombreux livres et publications [1], [2], [3] et [4].

Il s'agit ici d'un spectrographe gradué en longueurs d'ondes dont on transforme chaque raie en une suite de plages d'éclairement calibré par la méthode classique utilisant des lentilles cylindriques et des diaphragmes profilés.

Les figures 1, a et b, et 2 représentent l'appareil tel qu'il est actuellement construit. Il fonctionne dans le visible et une partie de l'ultra-violet (entre 3600 Å et 8000 Å). Cette limitation est due dans l'ultra-violet, à l'absorption du verre et dans le rouge au récepteur utilisé : une émulsion photographique (plaque photographique, format 9 × 12 cm).

Le premier chapitre de ce document est consacré à l'étude du principe de l'appareil et des caractéristiques de l'optique utilisée.

La réalisation et mise en oeuvre est décrite dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre donne quelques exemples sur les possibilités de l'appareil. Les mesures sont classées en deux catégories :

les unes reposent sur l'étude des courbes de noircissement ; elles conduisent à la détermination de :

l'intensité spectrale relative de plusieurs sources,
la répartition spectrale énergétique des lampes,
la sensibilité spectrale relative et absolue des émulsions,

les autres ont pour base l'observation des hauteurs de raies apparues sur la plaque photographique ; elles s'appliquent particulièrement à :

la mesure de l'absorption ou de la transmission spectrale d'une substance,
l'analyse d'un alliage.

(*) Cette étude constitue l'essentiel du travail présenté en thèse de 3° cycle par l'auteur le 8 juillet 1964

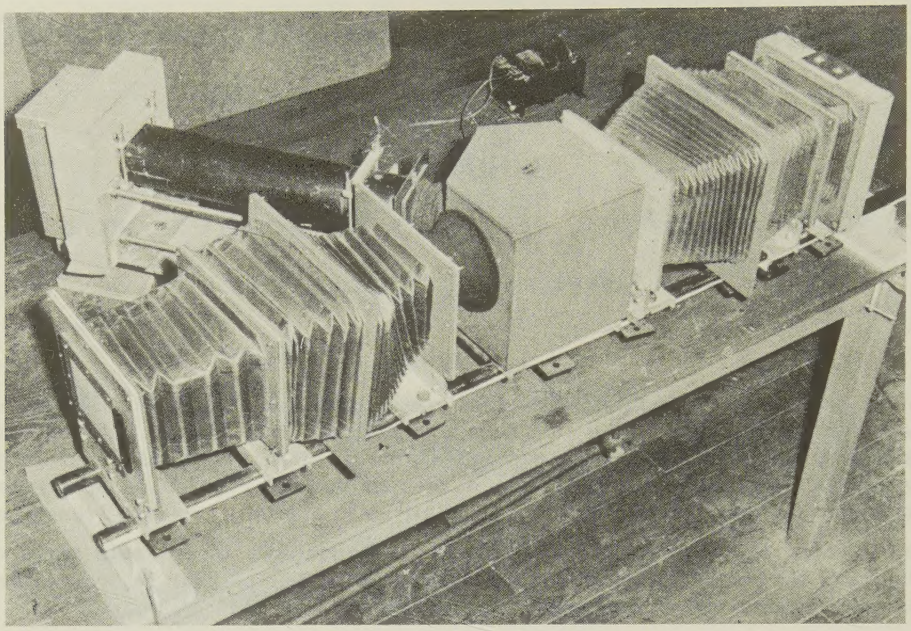

Fig. 1 a

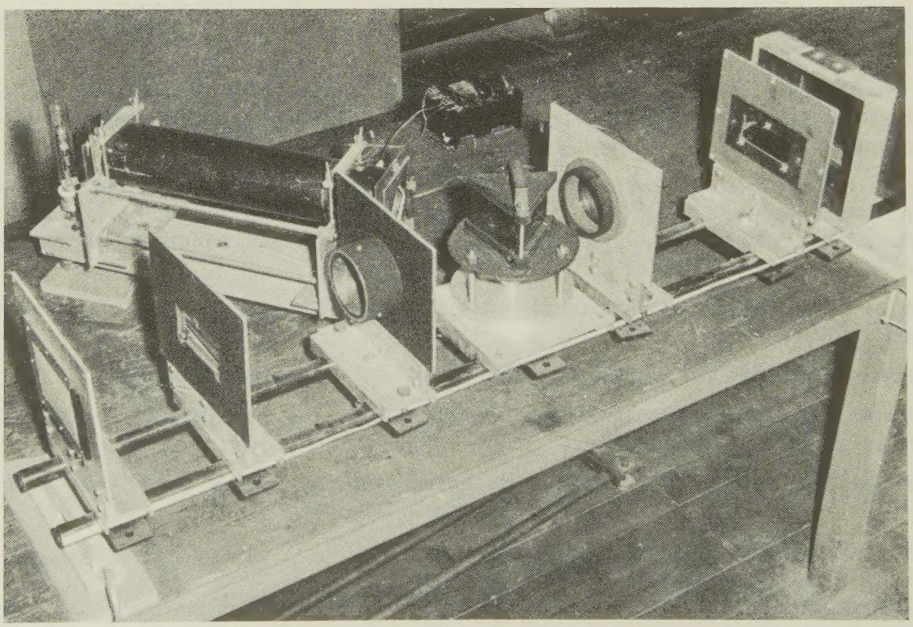

Fig. 1 b

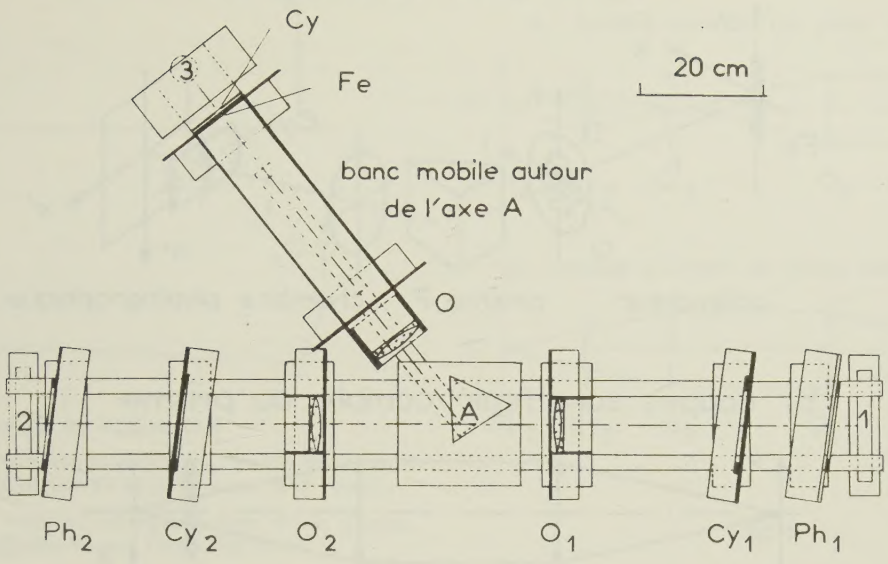

Fig. 2 - Schéma de l'appareil.

I - CARACTÉRISTIQUES OPTIQUES ET SCHÉMA DE PRINCIPE

Le problème est le suivant : réaliser un appareil dispersif permettant d'étudier pour chaque longueur d'onde, la réponse d'une émulsion à différentes luminations.

Le système dispersif est un spectrographe ordinaire dont le prisme P est réglé au minimum de déviation pour la raie verte du mercure. On lui annexe un dispositif sensitométrique (fig. 3a) constitué par un diaphragme à échelons D, fixé à la sortie du collimateur, et une lentille cylindrique Cy_1, placée entre l'objectif O_1 et la plaque photographique Ph_1.

A) Principe.

Le système optique O_1-Cy_1 transforme les nappes de rayons qui traversent D en focales dans le plan de l'émulsion Ph_1, et l'on observe un spectre de raies dont l'éclairement varie en hauteur suivant une progression donnée, définie par la loi de succession des échelons du diaphragme D (fig. 3b) [5].

B) Dimensions des raies dans le plan de l'émulsion Ph_1.

Quand l'appareil dispersif seul fonctionne, sans lentille cylindrique, chaque raie est l'image, à travers le système optique O-O_1 de la fente source Fe.

Lorsque la lentille cylindrique Cy_1 est mise en place (fig. 3b), la nappe de rayons qui traverse chacune des plages a du diaphragme D, est transformée en une focale a' dont la hauteur dh' est proportionnelle à la hauteur dh de l'échelon a du diaphragme D : dh' = g'dh (g', grandissement du système O_1-Cy_1).

La largeur x' de la focale est proportionnelle à la largeur x de la fente Fe : x' = gx (g, grandissement du système O - O_1).

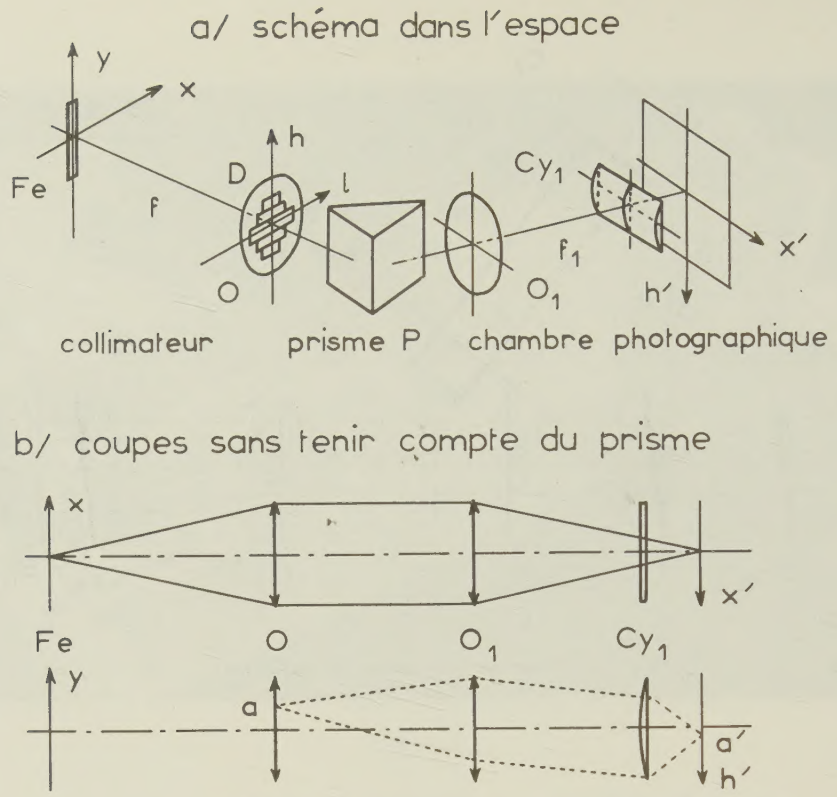

Fig. 3

C) Éclairement des raies.

L'objectif O est supposé éclairé uniformément d'une part, et d'autre part toute la lumière qui pénétre dans l'objectif O se retrouve dans le plan x'O'h', au coefficient τ de transmission de l'appareil près.

L'éclairement E de l'objectif est égal à $d\Phi/ds$ ($d\Phi$, flux reçu par l'élément ds de l'objectif O ou du diaphragme D : $ds = l\ dh$; l, largeur d'un échelon du diaphragme D, dh, sa hauteur .

Si ds' est la surface conjuguée de ds à travers le système O_1-Cy_1, l'éclairement de ds' est :

$$E' = \tau \frac{d\Phi}{ds'} = \tau E \frac{ds}{ds'} = \frac{\tau E l}{g'x'} \quad \text{avec } ds' = x'dh'.$$

En conclusion, l'éclairement E' des raies observées dans le plan Ph_1 est proportionnel à la largeur l de l'échelon.

Ceci n'est rigoureusement valable que si l'éclairement E du diaphragme D est uniforme. La figure 4 montre que ceci n'est réalisé qu'à ± 3,5 %.

D) Étalonnage en longueurs d'ondes de l'appareil.

Les raies spectrales peuvent être identifiées grâce à une échelle de longueurs d'ondes que l'on projette dans le plan du spectre (système optique Cy_2-O_2-O_1-Cy_1, fig. 2) après avoir enlevé le prisme.

La figure 5 indique le rôle de chacune des lentilles : la lentille cylindrique Cy_2 donne, des nappes de rayons qu'elle reçoit, une focale verticale en avant de O_2, que le système optique O_1-Cy_1 transforme en une autre focale, verticale, en Ph_1.

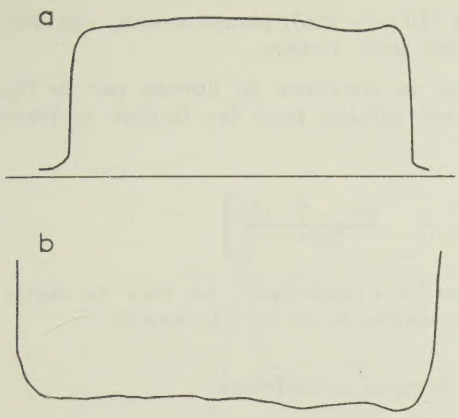

Fig. 4 - Eclairement de l'Objectif 0

a) suivant un axe horizontal (analyse directe au photomultiplicateur Lallemand 20 étages, sous 1400 volts) :

b) suivant un axe vertical (enregistrement d'une plaque photographique exposée devant l'objectif 0).

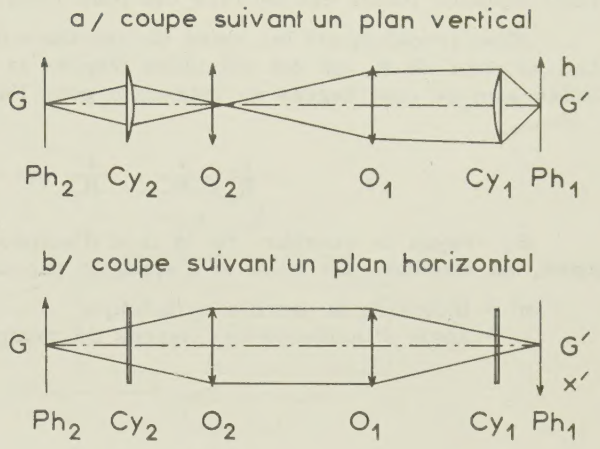

Fig. 5

E) Caractéristiques optiques.

Les trois objectifs utilisés O, O_1, O_2, sont de bons objectifs de série, de 80 mm de diamètre et d'environ 45 cm de distance focale.

Le prisme P a un angle de 60°. La détermination expérimentale de l'indice de son verre et la confrontation des résultats obtenus avec les valeurs données par le catalogue Parra-Mantois, permettent d'établir que ce verre est voisin du type F.D.D. C5034. Le pouvoir de résolution $\mathcal{R}$ du prisme, calculé à partir du critère de Rayleigh est d'environ $1,24.\ 10^4$. La dispersion, dans le plan de l'émulsion Ph_1 est de 101 Å/mm autour de la raie 5461 Å.

Le prisme introduit une courbure R_p des raies spectrales dont l'expression est [6] :

$$\frac{1}{R_p} = (n^2 - 1)\ \sin A/(f\, n \cos r \cos i')$$

et dont la variation, en fonction de la longueur d'onde, est représentée par la figure 6.

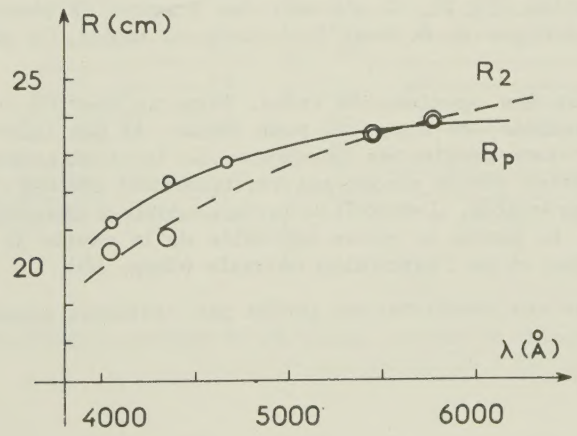

Fig. 6

Les lentilles cylindriques Cy_1 et Cy_2 sont identiques (10 × 4 cm), plan-convexe, chromatiques. Leur distance focale est de 11,8 cm pour l'une et 11,5 cm pour l'autre.

Elles transforment les raies de courbure R_ρ en raies de courbure R_2 donnée par la figure 6. Les valeurs de R_ρ ont été calculées d'après la loi suivante valable pour les faibles incidences [7] (elles sont de cinq degrés au maximum pour l'appareil) :

$$\frac{1}{R_\rho} - \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_1} \sin i \left[\frac{n' - 1}{n'} + \frac{(n'^2 - 1)\ i^2}{2n'^2} \right]$$

R_1 : rayon de courbure de la face d'entrée de la lentille cylindrique. La face de sortie étant plane, sa courbure est nulle et n'apparaît pas dans l'expression de la loi ci-dessus.

n' = indice de la lentille cylindrique
i = angle d'incidence des nappes de rayons sur la lentille cylindrique.

II - RÉALISATION ET MISE EN OEUVRE

L'appareil comporte trois parties (fig. 2) : un banc optique fixe, un bras mobile, le prisme et sa plate-forme, jonction des deux parties précédentes.

A) La partie mobile.

C'est une barre en aluminium, supportant le collimateur et la source lumineuse. Une lentille cylindrique Cy, de grande convergence (1 cm de distance focale) est placée devant la fente Fe du collimateur, elle assure l'homogénéité de l'éclairement de l'objectif O ; des diaphragmes placés à l'intérieur du tube du collimateur [8] éliminent les réflexions parasites de la lumière sur les parois du tube.

Les diaphragmes à échelons D, sont fixés devant l'objectif O du collimateur (fig. 9). Ce sont des plaques en maillechort de dimensions extérieures égales à 100 × 100 × 3 mm. Ils sont représentés sur la figure 7.

Les bords des plages sont biseautés de façon à réduire les réflexions parasites. Des fils de lin noir, de 0,5 mm de diamètre, sont tendus entre les diverses plages délimitées par les échelons successifs, et facilitent les réglages, les mesures et les observations.

Si les diaphragmes comportent des échelons étroits, on observe dans le plan de l'émulsion Ph_1 des franges de diffraction (fig. 8). Il s'ensuit des erreurs de photométrie qui sont cependant éliminées si l'image géométrique de la fente Fe couvre au moins, la première frange centrale de diffraction.

Ceci ne vaut que pour les spectres de raies. Pour un spectre continu le choix de la fente est fonction de la source utilisée, du temps de pose choisi, et des noircissements désirés sur la plaque photographique Ph_1. Les meilleures conditions de fonctionnement de l'appareil sont celles pour lesquelles le spectre obtenu sur la plaque est véritablement gradué : pour le plus grand échelon, le noircissement est appréciable, il décroît de façon sensible à chaque échelon jusqu'à s'annuler au dernier. Dans ce cas, la partie la mieux utilisable de la courbe H & D est obtenue : c'est le domaine de la sous-exposition et de l'exposition normale (chap. III).

Il est bien évident que ces conditions ne seront pas réalisées simultanément pour toutes les longueurs d'ondes.

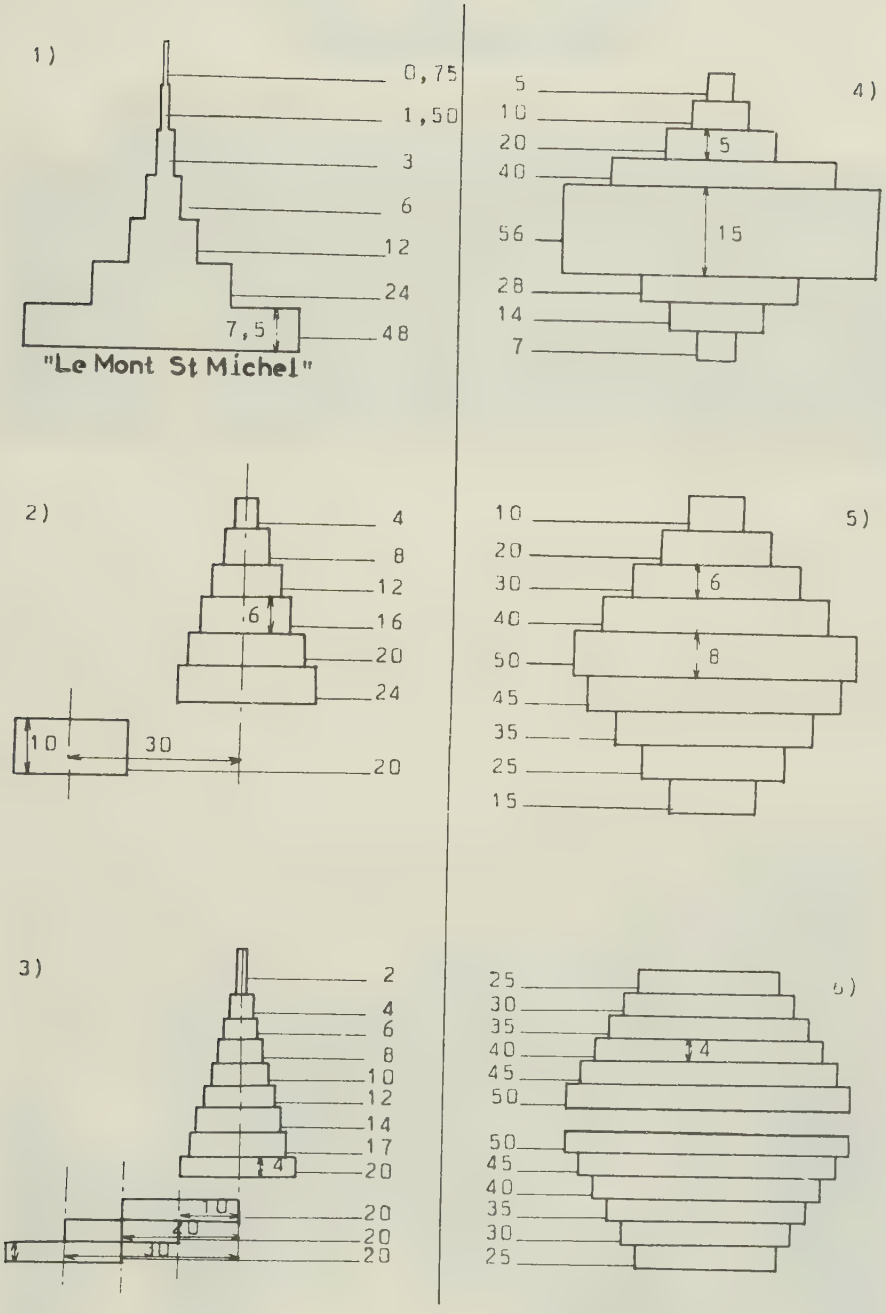

Fig. 7 - Schéma des diaphragmes profilés D (en marge, largeur de chaque échelon, cotes en mm).

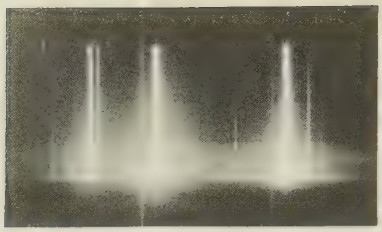

Fig. 8 a

Fig. 8b - Agrandissement de la partie supérieure de la fig. 8a.

B) Le prisme et sa plate-forme.

Le prisme P est monté de la façon habituelle (fig. 9). Les masses d'aluminium de son support ont été réparties approximativement dans les mêmes proportions en-dessous et au-dessus du prisme, ceci de façon à prévenir les variations de température et par suite les variations d'indice du prisme (ces dernières sont de l'ordre de $3,75.10^{-6}$ par degré, entre dix et cent degrés, pour la raie D, 5893 Å [9]).

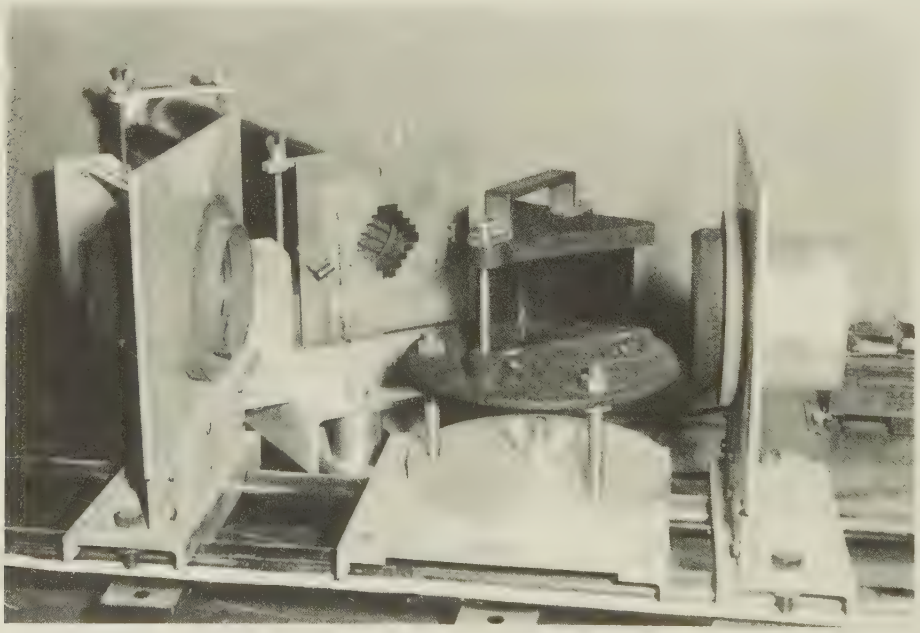

Fig. 9

C) Le banc optique fixe (systèmes 1 et 2).

Les positions relatives des diverses lentilles sont calculées par application des lois de l'optique géométrique.

La graduation G dont l'image est projetée dans le plan du spectre, en Ph_1, est obtenue par la méthode proposée par Duffieux et Grillet [10]. La figure 10 représente à l'échelle 1, le spectre d'une lampe à incandescence (opaline 100 watts Mazda), gradué en longueurs d'ondes.

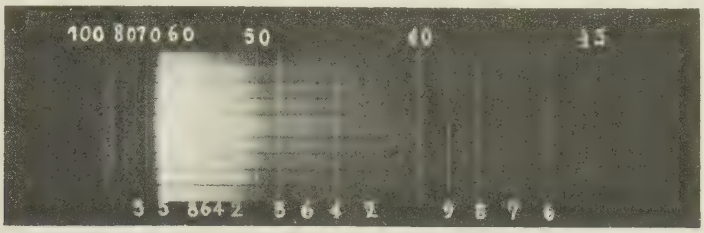

Fig. 10

III - APPLICATIONS. MESURES

Deux types de mesures sont à envisager : pour les unes, le tracé des courbes de noircissement est nécessaire, pour les autres, l'observation seule des clichés suffit.

A) Études à partir des courbes de noircissement.

Les caractéristiques des émulsions photographiques (courbes H & D, fig. 11) sont déterminées par photométrie des émulsions exposées en Ph_1 puis développées. On peut en déduire :

l'intensité relative de plusieurs sources,
la répartition spectrale énergétique des lampes,
la sensibilité spectrale relative et absolue des émulsions photographiques.

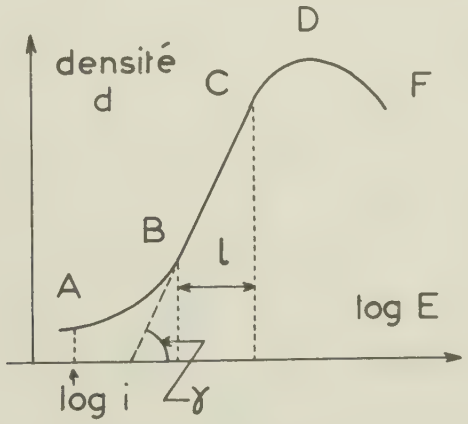

Fig. 11 - Courbe H & D d'une émulsion photographique. AB, sous-exposition, BC, exposition normale. CD, surexposition, DF, solarisation. E, éclairement, i, inertie, γ, facteur de contraste, l, latitude de plaque.

1/ *Remarques sur les courbes de noircissement* - La figure 12 représente l'une des courbes H & D obtenues avec l'appareil. Les mesures qui s'y rapportent sont groupées dans le tableau suivant.

échelons n°	log E	densité d
1	0,69897	0,88
2	1,00000	1,46
3	1,30103	1,88
4	1,60206	2,31
5	1,74819	2,45
6	1,44716	2,06
7	1,14613	1,44
8	0,84510	0,92

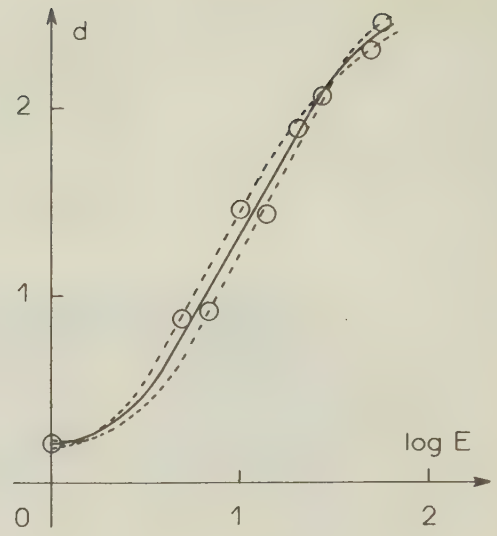

Fig. 12

Les anomalies que présente la figure 12 semblent systématiques : on distingue nettement deux ensembles de points situés sur deux courbes semblables (en pointillés sur la figure) ; la diffusion dans la gélatine, la non uniformité en hauteur de l'éclairement du diaphragme profilé D, un léger défaut de mise au point de l'image du diaphragme D dans le plan Ph_1 peuvent être invoqués pour expliquer ces phénomènes.

Cependant, la pente de la partie droite est la même dans les deux portions de courbes. La courbe moyenne, de même pente dans sa partie droite que celle des deux courbes expérimentales, peut être construite et utilisée pour les mesures photométriques.

Si l'on dispose d'un microphotomètre enregistreur donnant la transparence des clichés, les courbes H & D peuvent être remplaçées par des courbes qui leur sont analogues mais où la fonction densité d, est remplacée par la transparence de l'émulsion. Celle-ci est chiffrée en logarithme de la déviation (log T) mesurée en millimètres sur les enregistrements.

La figure 12 bis est un exemple des courbes obtenues. Par la suite, la majorité des études est effectuée à partir de ces courbes, elles seront désignées sous le nom de "courbes de gradation" des émulsions.

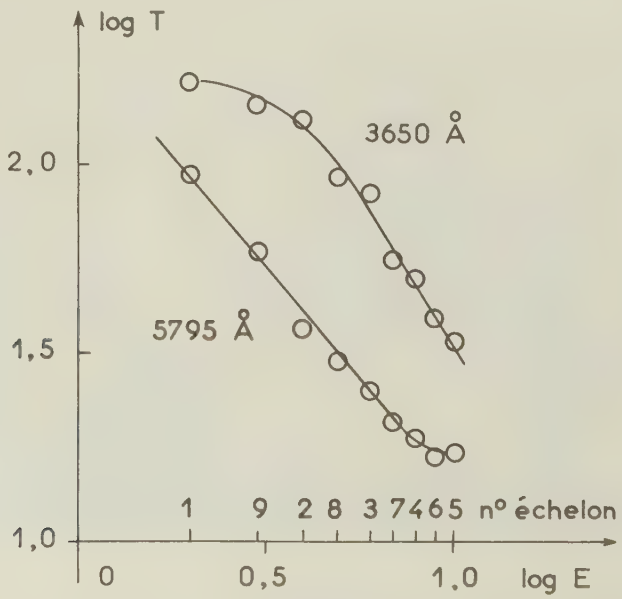

Fig. 12 bis

2/ *Intensité spectrale relative de plusieurs sources.*

Deux lampes sont comparées : une lampe 100 watts Mazda et une lampe 100 watts Philips "bleu solaire". Leur spectre est pris sur un même type d'émulsion (Guilleminot, "Panchro 66"), avec le même temps de pose (une minute), et le même diaphragme profilé, le numéro 5 (Chap. II, fig. 7). La figure 13 représente successivement les spectres de la lampe Philips HP 0,9 A, Zn-Hg -Cd, (a), de la lampe Mazda (b), de la lampe solaire Philips (c), le spectre a ne constituant ici qu'un repère de longueur d'ondes.

Le spectre de la lampe la plus intense (b) permet d'établir les courbes de gradation de l'émulsion utilisée. La transparence (log T) de l'émulsion au niveau des deux spectres b et c donnés par l'échelon le plus large est mesurée et l'éclairement log E correspondant, lu sur les courbes de gradation.

Le tableau suivant est dressé. L'indice i se rapporte à la lampe Mazda et l'indice s à la lampe solaire. Si E_i représente l'éclairement de la lampe Mazda donné par l'échelon le plus large de D, log E_i est égal à 1 pour toutes les longueurs d'ondes (chap. III, A).

λ(Å)	log T_s	log E_s	$\log \frac{E_s}{E_i}$	$\frac{E_s}{E_i} = \frac{I_s}{I_i}$
4500	2,26245	0,610	$\bar{1}$,610	0,407
4600	2,24055	0,575	$\bar{1}$,575	0,376
4700	2,22272	0,570	$\bar{1}$,570	0,371
4800	2,20140	0,540	$\bar{1}$,540	0,347
4900	2,18469	0,565	$\bar{1}$,565	0,367
5000	2,17026	0,550	$\bar{1}$,550	0,355
5100	2,18184	0,510	$\bar{1}$,510	0,324
5200	2,18469	0,500	$\bar{1}$,500	0,316
5300	2,14922	0,560	$\bar{1}$,560	0,363
5460	1,93450	0,625	$\bar{1}$,625	0,422
5600	1,81954	0,590	$\bar{1}$,590	0,389
5700	1,76343	0,565	$\bar{1}$,565	0,367
5800	1,69897	0,590	$\bar{1}$,590	0,389
5900	1,62325	0,670	$\bar{1}$,670	0,468
6000	1,55630	0,725	$\bar{1}$,725	0,531
6050	1,50515	0,800	$\bar{1}$,800	0,631
6100	1,47712	0,845	$\bar{1}$,845	0,700
6150	1,46240	0,820	$\bar{1}$,820	0,661
6200	1,43136	0,845	$\bar{1}$,845	0,700
6250	1,41497	0,845	$\bar{1}$,845	0,700
6300	1,41497	0,778	$\bar{1}$,778	0,600
6350	1,39794	0,699	$\bar{1}$,699	0,500
6440	1,38021	0,778	$\bar{1}$,778	0,600

La figure 14 donne une idée sur l'intensité spectrale relative des deux lampes : le rapport E_s/E_i des éclairements est proportionnel au rapport I_s/I_i des intensités des deux lampes.

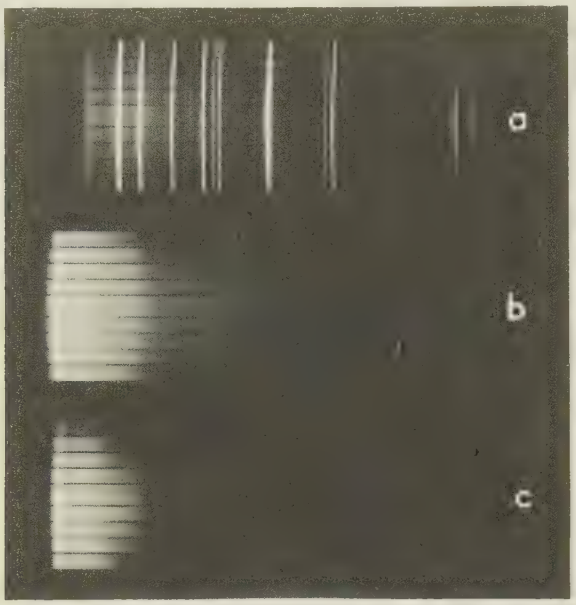

Fig. 13

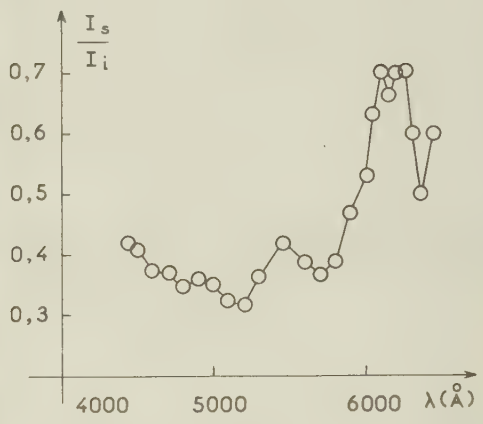

Fig. 14

Remarque : Les spectres des deux lampes à comparer auraient pu être obtenus en un seul temps au lieu de deux si un système optique supplémentaire avait été disposé devant la fente d'entrée de l'appareil [11].

3/ *Répartition spectrale énergétique des lampes.*

La méthode de mesure est la même qu'au paragraphe précédent mais l'une des lampes est une lampe étalon : connaissant l'intensité spectrale relative des deux lampes et l'énergie spectrale de l'une, on en déduit l'énergie spectrale de l'autre.

La lampe étalon est une lampe à ruban de tungstène dont la température de brillance dans le rouge est de 2200° K (mesure faite au pyromètre optique du Ribaud). Les tables de constantes [12] donnent la température de couleur T_c correspondante, soit 2450° K, et le pouvoir émissif monochromatique du tungstène à cette température.

La figure 15 représente les spectres étalon b (tungstène) et de référence a (Zn-Hg-Cd).

Les figures 16, 17 et 18 représentent respectivement la radiance spectrale énergétique R_λ du corps noir et du tungstène à la température T_c, l'intensité spectrale relative I_i/I_t des deux lampes (lampe Mazda *i* et lampe à ruban de tungstène *t*), et la radiance spectrale énergétique R_λ de la lampe Mazda.

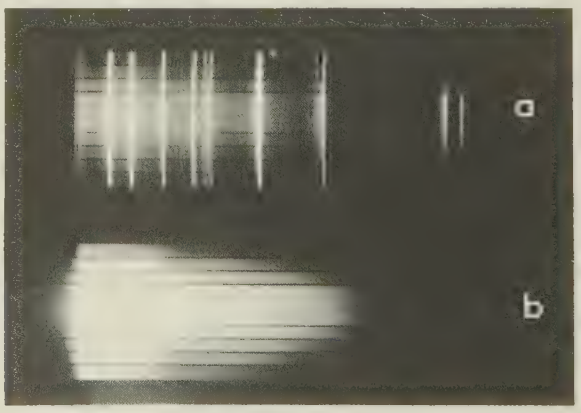

Fig. 15

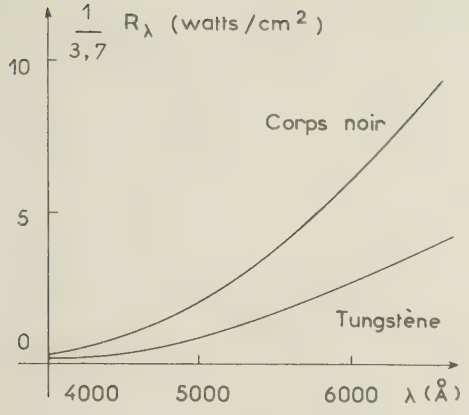

Fig. 16

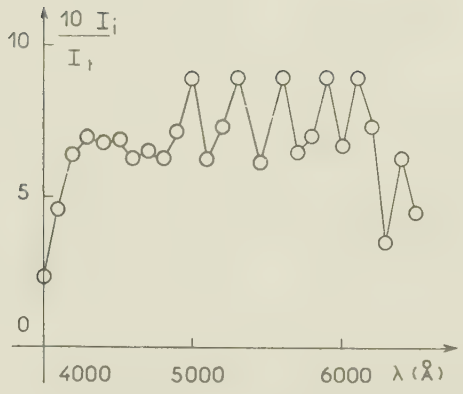

Fig. 17

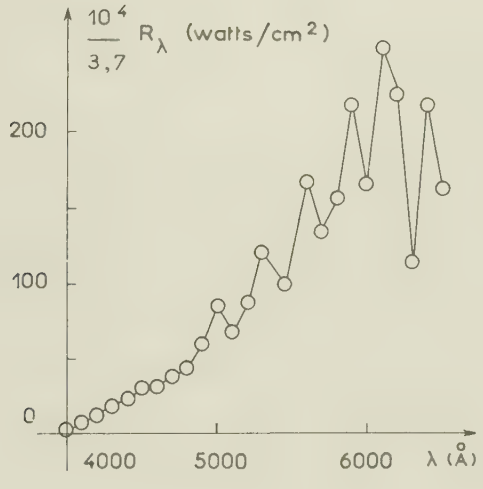

Fig. 18

4/ *Sensibilité spectrale relative de plusieurs émulsions.*

La sensibilité spectrale relative de deux émulsions peut être caractérisée de plusieurs manières :

soit par le rapport en fonction de la longueur d'onde des noircissements des émulsions produits par un même éclairement

soit par l'éclairement en fonction de la longueur d'onde, nécessaire pour produire un même noircissement.

La comparaison des émulsions Guilleminot "Panchro 66" et "Anécra" a été faite en les exposant successivement en Ph_1 pendant le même temps. La source utilisée est une lampe Philips Zn-Hg-Cd 0,9 A et le diaphragme profilé est le numéro 5.

Les courbes de gradation de chaque émulsion sont construites et utilisées pour tracer les figures 19 et 20.

La figure 19 représente, en fonction de la longueur d'onde, le rapport des transparences ($\log T_A/T_P$) des deux émulsions "Anécra" (A) et "Panchro 66" (P), pour un éclairement ($\log E$) donné. Les trois valeurs de $\log E$ choisies correspondent aux éclairements donnés par les échelons n° 5 ($\log E = 1$), n° 9 ($\log E = 0,47712$), n° 1 ($\log E = 0,30103$) du diaphragme D, type 5.

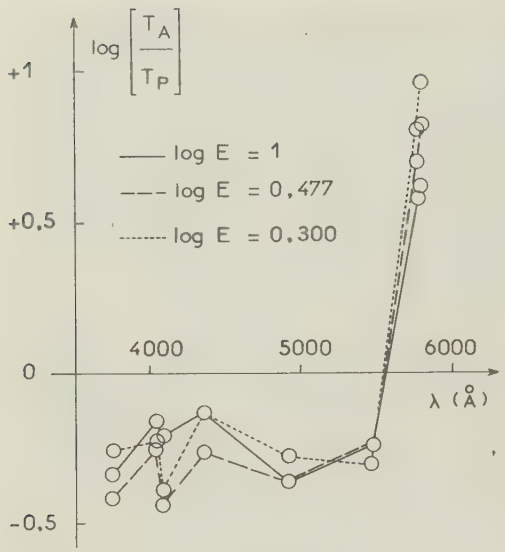

Fig. 19

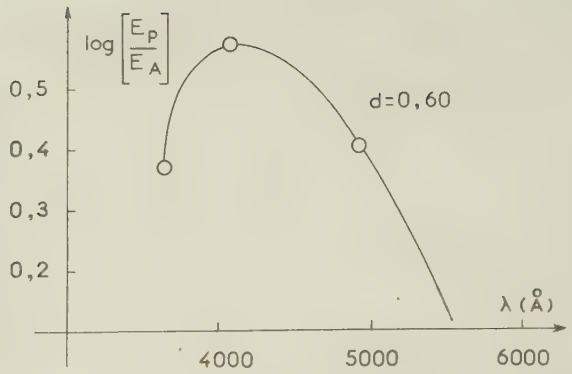

Fig. 20

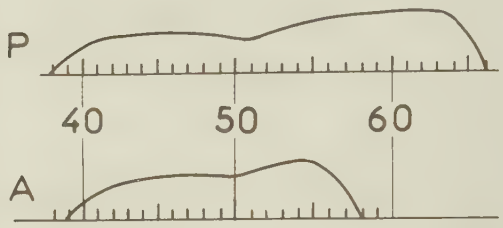

Fig. 21

Cette figure montre en particulier que, à partir de 5600 Å, l'émulsion P est beaucoup plus sensible que l'émulsion A, alors que c'est l'inverse entre 3600 Å et 5600 Å.

La figure 20 donne en fonction de la longueur d'onde, le rapport des éclairements de chaque émulsion (log E_P/E_A) nécessaire pour obtenir un noircissement donné (log T ou d).

Pour obtenir un noircissement donné, par exemple tel que log T = 1,5 (auquel correspond une densité d = 0,60), il faut un éclairement log E variable avec le type d'émulsion et la longueur d'onde ; la valeur de log E correspondant à log T = 1,5 est lue pour chaque longueur d'onde sur les courbes de gradation de l'émulsion utilisée.

Compte tenu des courbes de sensibilité fournies par la Maison Guilleminot pour les deux types d'émulsions "Panchro 66" (P) et "Anécra" (A) (fig. 21), les valeurs expérimentales ont été portées sur la figure 20.

La figure 20 montre que, pour obtenir une densité d = 0,60, il faut un éclairement beaucoup plus intense avec une émulsion P qu'avec une émulsion A, dans un domaine de longueurs d'ondes compris entre 3650 Å et 5700 Å. Par exemple, pour λ = 5180 Å, la figure 20 donne log E_P/E_A = 0,3. D'où E_P/E_A = 2 ; il faut donc un éclairement deux fois plus intense avec l'émulsion P qu'avec l'émulsion A pour cette longueur d'onde.

5/ *Sensibilité spectrale absolue d'une émulsion.*

Il s'agit d'évaluer quelle radiance spectrale énergétique R_λ est nécessaire pour produire un noircissement constant de l'émulsion, quelque soit la longueur d'onde.

Le procédé est le même qu'au paragraphe précédent, mais la source utilisée, au lieu d'être quelconque, est une lampe étalon, par exemple à ruban de tungstène.

A la valeur log E nécessaire pour produire un noircissement donné correspond une fraction E/E_o de l'éclairement E_o donné par l'échelon le plus large de D, et par suite, une fraction E/E_o de la radiance spectrale énergétique $R_{o\lambda}$ donnée par cet échelon. (Pour le diaphragme 5 utilisé, log E_o = 1,04922 ; $R_{o\lambda}$ est lu directement sur la figure 16).

En définitive, la valeur R_λ de la radiance spectrale énergétique produisant un noircissement donné de l'émulsion est égale à $R_\lambda = R_{o\lambda} E/E_o$.

La figure 22 donne la sensibilité spectrale d'une émulsion Guilleminot "Panchro 66".

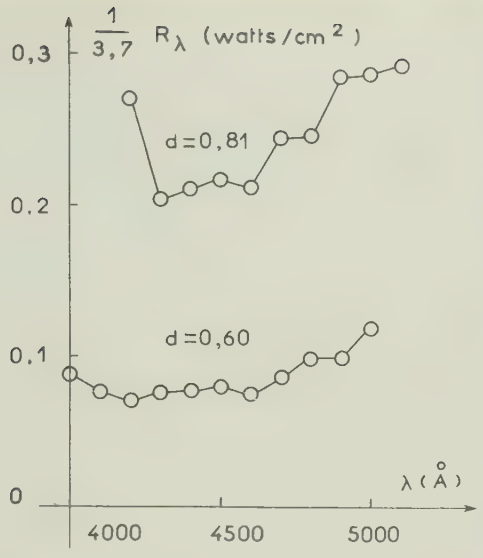

Fig. 22

6/ *Absorption du prisme en fonction de l'épaisseur de verre.*

Il est possible de mesurer l'absorption du prisme de l'appareil, en fonction de l'épaisseur de verre.

Le principe de la mesure est le suivant : des flux égaux de lumière ayant traversé des épaisseurs différentes de verre absorbant, ne produisent pas le même noircissement sur la plaque photographique.

Il s'agit d'isoler des faisceaux identiques de lumière qui ne traversent pas la même épaisseur de verre ; les diaphragmes profilés 2 et 3, ont plusieurs échelons de mêmes dimensions ; les faisceaux de lumière qu'ils laissent passer, traversent une longueur de verre, l'un près de l'arête du prisme, l'autre vers la base, deux autres vers le milieu. Avec le diaphragme 2, seuls deux de ces faisceaux sont isolés.

Le noircissement d qu'ils produisent sur l'émulsion en Ph_1 est mesuré. L'éclairement log E correspondant à d est lu directement sur les courbes de gradation de l'émulsion : celles-ci sont établies grâce à une série d'échelons qui graduent le faisceau le moins absorbé - celui qui traverse le prisme du côté de l'arête - ; ce dernier parcourt une longueur e_o de verre (e_o = 52,6 mm) et produit un éclairement E_o (pour le diaphragme 3, log E_o = 1). La fraction de lumière qui sort du prisme après un parcourt e dans le prisme est E/E_o, ou I/I_o (I : intensité de lumière correspondant à E).

La figure 23 représente les spectres obtenus en Ph_1, avec une lampe Zn-Hg-Cd Philips HP 0,9A (a) et avec une lampe ML 160 Philips (b et c). Les diaphragmes profilés D sont successivement le numéro 2 (a et b) et le numéro 3 (c). Les trois clichés a, b, c, sont pris sur plaque Guilleminot "Panchro 66".

La figure 24 représente une des courbes H & D. Les mesures effectuées sont portées sur le tableau suivant et la figure 25 représente la fraction de lumière I/I_o qui sort du prisme après un parcourt de longueur e dans le prisme.

x (cm)	0	1	2	3
$e-e_o$(cm)	0	2,08	4,16	6,24
d	1,03	0,99	0,98	0,85
log E	1	0,93	0,92	0,82
log E/E_o	0	$\bar{1}$,93	$\bar{1}$,92	$\bar{1}$,82
E/E_o	1	0,85	0,83	0,66

x = abcisse des échelons du diaphragme D, comptée à partir de l'axe de symétrie de la série d'échelons gradués.

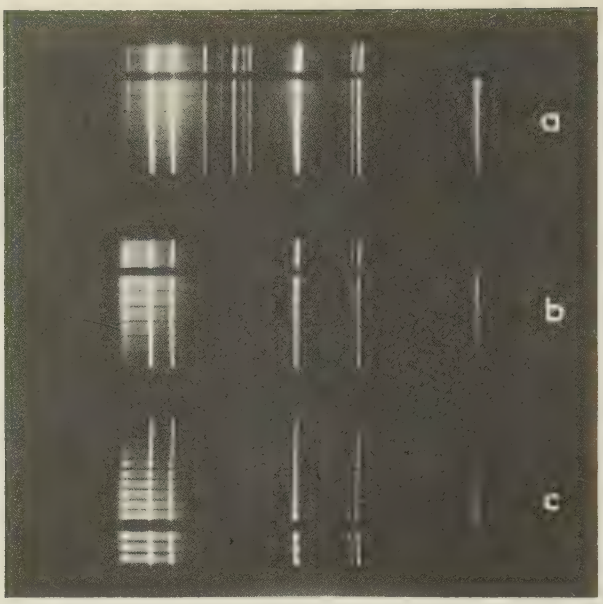

Fig. 23

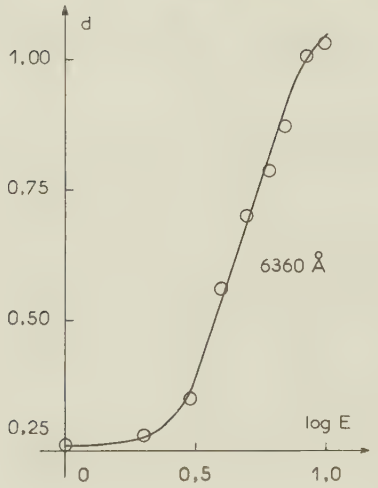

Fig. 24

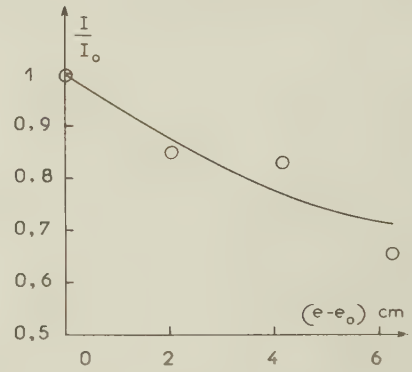

Fig. 25

B) Études à partir des hauteurs de raies observées sur les clichés.

Ce chapitre comporte : 1/ la mesure de l'absorption d'une substance en fonction de la longueur d'onde
2/ l'analyse d'un alliage.

1/ *Mesure de l'absorption d'une substance.*

On se propose de vérifier la neutralité d'une densité ou de déterminer la courbe de transmission spectrale d'un verre coloré.

Deux méthodes sont possibles : faire deux clichés successifs, l'un, un spectre de comparaison pris avec un temps de pose donné, l'autre, pris avec interposition de la densité neutre ou du verre coloré devant la fente Fe du sensitomètre. Avec le verre coloré, le temps de pose doit être le même que pour le cliché de comparaison. Avec le verre neutre au contraire, il doit être calculé de façon à ce que, en supposant le verre réellement neutre, les flux de lumière reçus par l'émulsion soient les mêmes que pour le cliché de comparaison.

Une deuxième solution consiste à opérer en un seul temps mais il faut utiliser un système optique complémentaire [10].

La première méthode a été utilisée ici, mais que l'on procède de l'une ou l'autre manière, le dépouillement se fait toujours de la même façon. Dans les deux cas il s'agit de comparer les clichés obtenus avec et sans verre absorbant.

La figure 26 représente le spectre d'une lampe Philips HP 0,9 A Zn-Hg-Cd, avec le diaphragme 5. Le temps de pose est d'un quart de seconde pour le cliché a. Pour le cliché b une densité neutre (d = 0,70) est placée devant la fente Fe. Le temps de pose est de deux secondes. Pour le cliché c, la densité est remplacée par un verre coloré. Le temps de pose est d'un quart de seconde.

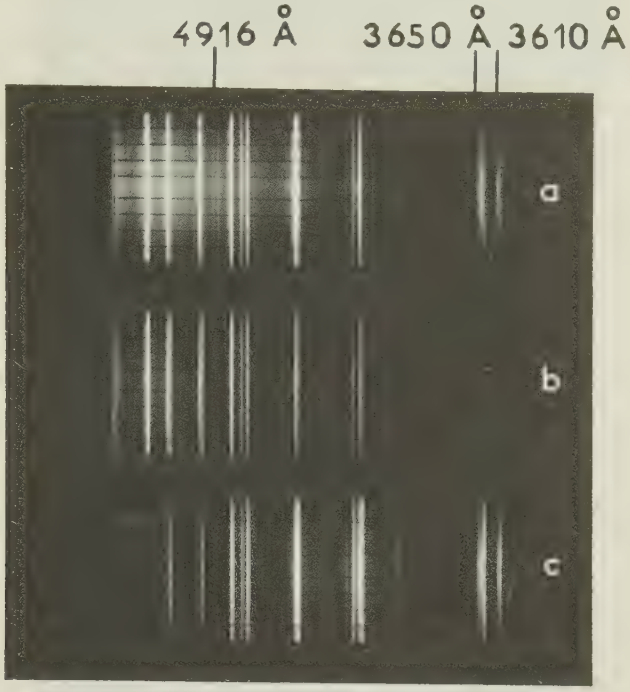

Fig. 26

La comparaison des deux premiers clichés montre que :

1/ les raies 3610 et 3650 Å du spectre de comparaison ont complètement disparu sur le cliché b.

2/ sur le cliché a, le raie 4916 Å apparaît à tous les niveaux ; le noircissement apparent le plus faible (donné par le premier échelon) est égal à d. Le flux envoyé par cet échelon est $\varphi = ES$ (S = 10 × 6 mm, surface du premier échelon ; E, éclairement de cette surface). Sur le deuxième cliché, le noircissement apparent d n'apparaît qu'à la troisième plage (donnée par le troisième échelon). Le flux envoyé par cet échelon est $\varphi' = E'S'$ (S' = 30 × 6 mm, surface du troisième échelon ; E', son éclairement).

Les flux de lumière φ et φ', produisent le même noircissement d (pour la longueur d'onde 4916 Å). Ils sont donc égaux : $ES = E'S'$ ou $E'/E = S/S' = 10/30 = 1/3$.

En conclusion, vers 4916 Å, la densité absorbe 1/3 du rayonnement incident.

2/ *Analyse d'un alliage.*

Le problème est de déterminer le pourcentage d'un élément (Fe, Co, Ni,...) dans un alliage, par exemple un acier.

Le principe de la mesure est le suivant : plus le pourcentage de l'élément dans la substance est élevé, plus les raies de son spectre sont intenses. Si l'alliage étudié constitue par exemple la cathode d'un arc électrique utilisé comme source lumineuse du sensitomètre, la hauteur des raies apparues en Ph_1 est d'autant plus grande que le pourcentage est plus élevé.

La méthode consiste à comparer les raies du spectre de chaque élément d'un alliage aux raies d'un spectre de référence donné par un seul élément (par exemple le fer) de concentration constante.

L'instrument de travail principal est la courbe indiquant le pourcentage de l'élément en fonction du rapport des hauteurs (ou plutôt des éclairements produisant le plus faible noircissement) des raies du spectre de l'alliage à étudier et de celui de l'élément de référence.

Trois échantillons "témoins" sont utilisés pour déterminer la courbe de travail. Ils possèdent tous les éléments simples dont on voudra étudier, par la suite, le pourcentage dans les alliages, et ces pourcentages sont assez différents les uns des autres. Ces données sont obtenues par analyse chimique.

Le tableau suivant donne la composition de quatre aciers b, c, d, e.

échantillon / éléments dosés	b	c	d	e
C	0,090	0,070	0,070	0,45
Mn	0,64	0,37	0,20	0,47
Si	0,060	0,060	0,003	0,070
S	0,014	0,016	0,018	0,028
P	0,012	0,011	0,013	0,017
Ni	1,31	1,25	0,94	0,91
Cr	0,89	0,55	0,51	1,25
Mo	0,090	0,080	0,080	0,110
Cu	0,150	0,150	0,16	0,16
Fe	96,744	97,443	98,006	97,535

Des échantillons de ces quatre alliages constituent successivement la cathode d'un arc électrique placé devant la fente du sensitomètre. Les figures 27 b,c,d,e représentent le spectre observé en Ph_1. Le spectre 27 a (Zn-Hg-Cd) constitue un repère de longueurs d'ondes.

Il faut choisir pour chaque élément, deux ou trois raies "sensibles" qui ne soient ni trop faibles ni trop intenses pour apparaître ou disparaître à tel ou tel niveau, suivant le pourcentage de l'élément.

La hauteur des raies sensibles de chaque élément est comparée à celle des raies de l'élément de base ; puis la courbe d'étalonnage est construite.

Le spectre de l'alliage à étudier est obtenu par la même méthode que celle employée pour les échantillons témoins, et dans les mêmes conditions.

La hauteur des raies sensibles, caractéristiques de chaque élément, est observée et le pourcentage correspondant, lu sur la courbe d'étalonnage.

Remarque - Ce sytème a longtemps été utilisé dans les aciéries : à chaque instant, il faut contrôler la composition de l'alliage que l'on coule. Au moment voulu, un échantillon de l'alliage est prélevé. Puis il est envoyé au laboratoire d'analyse qui en évalue la composition. Les résultats sont renvoyés immédiatement à l'atelier de coulée, par un système analogue à celui employé pour les télégrammes dans les postes ; la marche de la coulée est modifiée selon les résultats obtenus. Actuellement cependant, ce type d'appareil est remplacé par des machines beaucoup plus rapides et précises, du type du quantomètre [13] et il ne s'écoule pas plus de trois minutes entre le départ de l'échantillon vers les laboratoires d'analyse et son retour avec les renseignements voulus.

CONCLUSION

L'appareil étudié dans ce travail, est actuellement utilisable dans le visible pour les mesures courantes de photométrie (plaque photographique ou film).

Son domaine d'utilisation ne peut être étendu à l'ultra-violet, à moins de remplacer les pièces optiques par des éléments transparents dans la région des courtes longueurs d'ondes (quartz ou fluorine). Cette modification serait particulièrement intéressante pour l'analyse des alliages : la plupart des raies caractéristiques des métaux sont en effet violettes ou ultra-violettes.

Par contre, dans l'infra-rouge, au moins proche, il suffirait de remplacer le prisme, facilement escamotable, par un réseau. Le récepteur ne serait plus la plaque photographique mais une cellule.

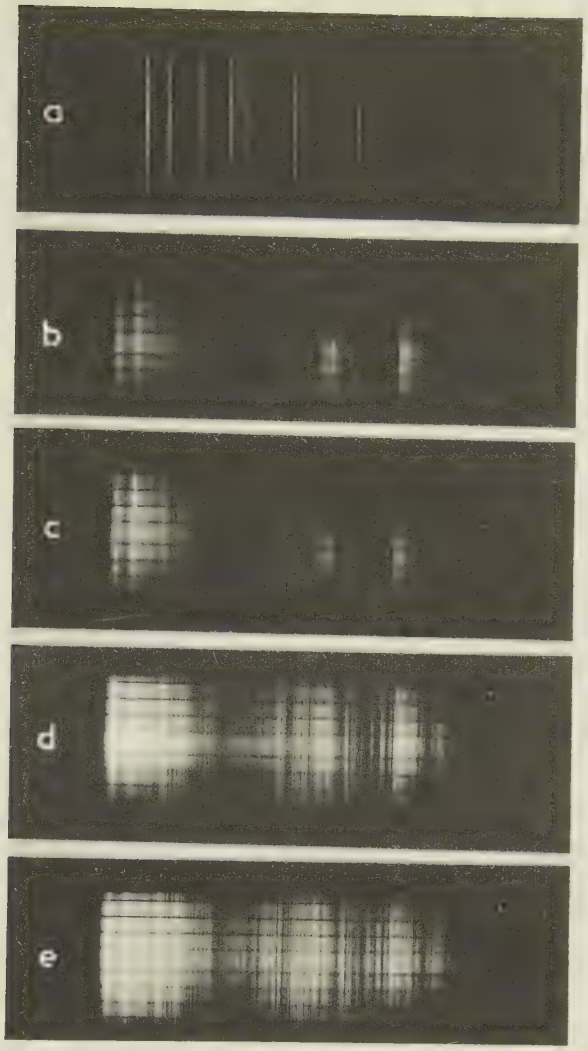

Fig. 27

RÉFÉRENCES

[1] F. TWYMAN, 1951 - Metal spectroscopy, p. 129, Charles Griffin & Company Ltd.

[2] G. de VAUCOULEURS, 1956 - Manuel de photographie scientifique, pp. 260-267, Ed. Rev. Opt., Paris.

[3] P. MICHEL, 1953 - La spectroscopie d'émission et ses applications, pp. 122-138, Coll. A. Colin, Paris.

[4] J. DUFAY, 1961 - Introduction à l'astrophysique : les étoiles, pp. 113-114, Coll. A. Colin, Paris.

[5] L. GRILLET, 1932 - Bull. Soc. Sc. Bretagne, IX, fasc. 3-4.

[6] A. MARÉCHAL, 1952 - Imagerie géométrique. Aberrations, p. 201, Ed. Rev. Opt. Th. Instr. Paris.

[7] P. M. DUFFIEUX, 1933 - Bull. Soc. Sc. Bretagne, X, fasc. 3-4.

[8] J. Ch. VIÉNOT, 1960 - Réalisation d'un périodographe optique. Applications à l'étude des fonctions de transparence, p. 70, Thèse Paris.

[9] H. DUFET, 1899 - Données numériques. Optique, pp. 459 et 462, Gauthier-Villars, Paris.

[10] P. M. DUFFIEUX et L. GRILLET, 1937 - Bull. Soc. Sc. Bretagne, XIV, fasc. 1-2.

[11] P. M. DUFFIEUX et L. GRILLET, 1933 - Rev. Opt., 12, pp. 425-448.

[12] G. RIBAUD, 1931 - Traité de pyrométrie optique, p. 432, Ed. Rev. Opt. Th. et Instr., Paris.

[13] J. TERRIEN, 1954 - La spectroscopie, p. 99, Coll. Que-sais-je, P.U.F., Paris.

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

Besançon, le 3 JUILLET 1964
Le Doyen,
R. JACQUEMAIN

Vu et Permis d'imprimer
Besançon, le
Le Recteur,
H. GAUTHIER